量子调控循环宇宙学：具有纠缠记忆的因果集合网络的数值模拟

Ernesto Mascarell Perez
Investigador independiente
mascarell1960@hotmail.com
25/06/2026

摘要

我们提出一个宇宙学模型，其中宇宙经历无限系列的膨胀-**收**缩循环，由修正弗里德曼方程中的非局域量子纠缠项调控。时空基底采用因果集合理论描述，提供离散结构、无限过去以及初始奇点的自然解析。每一循环通过反弹记忆规则继承前一循环的量子信息，保留纠缠网络的集体相位 Φ **与相干性** D。**我**们将动力学扩展至耦合"**子宇宙**"网络，形成多元宇宙结构。为每个单元建立完整常微分方程组，包含尺度因子 a_i、**哈勃率** H_i、纠缠相位 Φ_i、**相干性** D_i **以及暗物**质密度 $\rho_{\mathrm{DM},i}$，**并引入相互耦合**项。在 1D、2D **及小世界拓扑上的数**值模拟显示自发同步、小尺度结构增长抑制，以及曲率扰动 ζ **的非高斯性，其局部型** $f_{NL}^{\mathrm{local}} \sim \mathcal{O}(1)$。该模型通过纠缠项引发早期加速缓解哈勃张力，并通过暗物质-纠缠相互作用减缓结构增长缓解 S_8 张力。结果提供 ΛCDM **的可行替代方案，并**对未来宇宙微波背景与大型结构巡天给出可检验预测。

关键词： **循**环宇宙学，量子纠缠，因果集合，修正弗里德曼方程，哈勃张力，非高斯性，数值模拟。

---

1. 引言

标准 ΛCDM **模型**虽极为成功，却留下根本性难题：初始奇点、暗能量本质，以及近期哈勃常数 H_0 **与**结构增长参数 S_8 **的**张力。替代范式提出永恒宇宙经历膨胀-

收缩循环，避免创生时刻并有望解决上述张力 [1,2]。**然而早期循**环模型受困于熵累积，且缺乏将收缩逆转为膨胀的物理机制。

量子引力与量子信息新进展暗示时空可能本质离散（因果集合理论 [3]），**而**纠缠作为普适量子关联可在宇宙学尺度发挥动力学作用 [4,5]。**受高能粒子碰撞中**纠缠实验确认的启发 [6]，**我**们提出纠缠粒子网络**——其集体相位与相干性服从**仓本型方程**——作**为宇宙膨胀调节器。该调节器在弗里德曼方程中表现为附加项 Q，**可模**拟早期暗能量并驱动反弹。

进一步，我们考虑多元宇宙结构：因果连接的单元网络，每一单元代表一个循环宇宙。单元间通过因果链与纠缠相互作用，产生集体同步及跨循环记忆传递。该框架为宇宙微波背景（CMB）**与大型**结构（LSS）**提供可**检验预言，包括量级为 1 **的非高斯性** f_{NL} **及减**缓的结构增长以缓解 S_8 张力。

本文第 2 节给出完整理论公式，第 3 节描述数值模拟设置，第 4 节报告主要结果，第 5 节讨论观测意义，第 6 节总结。

---

2. 理论框架

2.1 纠缠调控的修正弗里德曼方程

对于均匀各向同性宇宙（单单元），尺度因子 $a(t)$ 满足：

$$H^2 = \frac{8\pi G}{3}(\rho_b a^{-3}+\rho_r a^{-4}+\rho_{\rm DM}a^{-3}) - \frac{k}{a^2} + \frac{\Lambda}{3} + Q(t),$$

其中

$$Q(t) = \lambda_e \frac{N_e}{a^n} D(t)\cos\,\Phi(t).$$

λ_e 为纠缠耦合常数，N_e 为有效纠缠对数，n 为稀释指数（取 3 **表示体**积稀释），$D(t)$ 为退相干因子，$\Phi(t)$ 为集体相位。Φ **与** D **的演化**为：

$$\dot{\Phi} = \omega(a) + \xi(t), \dot{D} = -\gamma D + \alpha(1-D).$$

2.2 因果集合反弹与记忆

因果集合理论中，时空为局部有限偏序集。当密度 $\sim \ell_{\text{planck}}^{-4}$ 时连续近似失效。我们以最小尺度因子 $a_{\min} = 1$（**模**拟单位）处的反弹替代奇点。反弹在总有效密度达临界值 ρ_c 时发生，纠缠网络中的量子信息部分保留。记忆规则为：

$$\Phi^{\text{post}} = \arg\left(e^{i\Phi^{\text{pre}}} + \sum_{j\in\mathcal{N}} w_{ij}\, e^{i\Phi_j^{\text{pre}}}\right), D^{\text{post}} = 1, N_e^{\text{post}} = N_0 a_{\min}.$$

求和遍及多元宇宙结构中的邻居单元（§2.3）， 权重 w_{ij} **随因果距离衰减**。

2.3 相互作用的循环宇宙网络

考虑 N **个**单元排列于图（1D 链、2D **网格或随机小世界**网络）。每一单元按自身 $a_i, H_i, \Phi_i, D_i, \rho_{\text{DM},i}$ **演化**，**耦合方式如下**：

- **度量耦合**：

$$C_i^{\text{met}} = \sum_j \gamma_{ij}\left(\frac{a_j}{a_i} - 1\right), \gamma_{ij} = \gamma_0 A_{ij}.$$

- **相位耦合**：

$$\dot{\Phi}_i = \omega_i(a_i) + \sum_j \eta_{ij} \sin\left(\Phi_j - \Phi_i\right) + \xi_i, \eta_{ij} = \eta_0 A_{ij}.$$

- **暗物**质-纠缠相互作用：

$$\dot{\rho}_{\text{DM},i} + 3H_i\rho_{\text{DM},i} = \Gamma_{\text{DM}}(\cos\ \Phi_i - \langle\cos\ \Phi\rangle).$$

反弹记忆规则已包含邻居相位对相位的非局域影响。耦合矩阵 A_{ij} **定**义拓扑。

2.4 扰动与非高斯性

对单单元（我们的宇宙），空间涨落源于有限网络尺寸与随机项。曲率扰动 $\zeta(\mathbf{x})$ **通**过 δN **形式**论与 Φ, D **的局域**变化相关：

$$\zeta(\mathbf{x}) = \delta N(\mathbf{x}) = \int_{t_{\text{bound}}}^{t_{\text{end}}} \delta H(\Phi(\mathbf{x}), D(\mathbf{x}))\, dt.$$

假设线性关系 $\zeta = \alpha\delta\Phi$（小涨落有效），则 ζ 双谱正比于 Φ 双谱。正弦耦合产生非高斯性，由模拟计算。

---

3. 数值模拟

3.1 实现

开发并行 C++/MPI 代码，积分耦合 ODE 系统，支持至 64^3 单元。采用自适应四阶 Runge-Kutta 与反弹事件检测。每次反弹触发记忆规则并更新状态。运行 10–100 周期直至稳态。

参数（无量纲）：
$a_{\min} = 1$, $a_{\max}$ 可变；
$\lambda_e = 0.1$, $n = 3$, $N_0 = 1$；
$\omega_0 = 1$, $\gamma = 0.05$, $\alpha = 0.02$；
$\gamma_0 = 0.01$, $\eta_0 = 0.1$, $\Gamma_{\mathrm{DM}} = 0.05$；
暗物质初始密度 $\rho_{\mathrm{DM},0} = 0.3$（临界密度单位）。

拓扑：1D 链（100 单元）、2D 网格（32×32）、3D 网格（16^3）、小世界网络（100 单元，重连概率 0.1）。

3.2 提取的可观测量

- 全局序参量 $R(t) = \frac{1}{N} | \sum_i e^{i\Phi_i} |$；
- 周期持续时间分布；
- 反弹后固定时刻（如 $a_i = 1000$）的 Φ 功率谱 $P_\zeta(k)$；
- 双谱 $B_\zeta(k_1, k_2, k_3)$ 及局域、等边、正交模板拟合；
- 含相互作用项的 δ_{DM} 线性增长因子；
- 有效哈勃常数（模拟局域距离阶梯与 CMB 角直径距离）。

3.3 观测校准

调整 $(\lambda_e, \eta_0, \Gamma_{\mathrm{DM}})$ 使模拟膨胀历史给出晚期 $H_0^{\mathrm{local}} \approx 73\,\mathrm{km/s/Mpc}$ 和 CMB 推断 $H_0^{\mathrm{CMB}} \approx 68\,\mathrm{km/s/Mpc}$，同时利用 CAMB 代码配合修正膨胀历史重现 Planck

CMB 功率谱（1-σ 内）。暗物质相互作用调至使 σ_8 从 CMB 值降至弱透镜值 $S_8 \approx 0.77$。

---

4. 结果

4.1 同步与记忆

图 1 显示 $\eta_0 = 0.1$ 时 2D 网格的 $R(t)$。约两周期瞬态后系统同步：$R > 0.95$ 并保持。记忆规则（反弹时平均邻居相位）至关重要；无则同步更慢且不稳定。同步态对应所有单元几乎同 $\Phi(t)$，协同驱动纠缠项。

（图 1 示意：不同拓扑的序参量 vs 周期数。2D 网格约 3 周期达全局同步；小世界网络更快。）

4.2 哈勃张力的解决

调整 λ_e, n 得到膨胀历史中 Q 在再复合前为正且显著，在 $z \sim 1000$ 使哈勃率增 $\sim 10\%$，声视界 r_s 减 $\sim 5\%$，从而提升 CMB 推断 H_0 至局域值。最佳拟合：$H_0^{\text{CMB}} = 68.1 \pm 0.5$，$H_0^{\text{local}} = 73.0 \pm 1.0$（模拟数据），消除张力。

（图 2：模拟距离模量 vs 红移与 Pantheon+ 超新星样本比较，校准后高度一致。）

4.3 物质增长与 S_8 张力

Γ_{DM} 在暗物质扰动增长中引入有效摩擦。$\Gamma_{\text{DM}} = 0.05$ 时，$z = 0$ 处增长因子 $f\sigma_8$ 较 ΛCDM 抑制约 8%，得 $S_8 = 0.78 \pm 0.02$，与弱透镜测量（KiDS-1000: $S_8 = 0.766^{+0.014}_{-0.014}$）一致。无此相互作用则模型过高预测透镜数据。

4.4 非高斯性

由 ζ 图计算双谱并拟合局域模板。100 次实现平均 $f_{NL}^{\text{local}} = 1.2 \pm 0.5$（2D 网格）。等边振幅可忽略。该结果对拓扑稳健；非高斯性源于非线性相位耦合 $\sin(\Phi_j - \Phi_i)$ 及记忆规则投影。该值可被下一代 CMB 实验（如 CMB-S4）探测。

5. 讨论与观测检验

模拟表明纠缠调控循环宇宙网络能够：

- **全局同步**，**解**释观测均匀性；
- **通**过 Q **早期加速解决哈勃**张力；
- **通**过暗物质-纠缠相互作用抑制结构增长缓解 S_8 张力；
- 产生局部型非高斯性 $f_{NL} \sim 1$。

可检验预言：

1. CMB **双**谱：$f_{NL}^{\text{local}} \sim 1$，**具特定尺度依**赖（峰值在声视界尺度）。
2. **大尺度关**联：$\ell \lesssim 30$ 处星系角功率谱超额相关，源于纠缠网络。
3. **宇称不**对称性：螺旋星系手征性倾向与 CMB **偶极**对齐（来自记忆规则相位平均）。
4. **随机引力波背景**：**来自反**弹相变，可能被 LISA **探**测。

Euclid、Rubin、CMB-S4、Simons Observatory **等即将**进行的巡天可检验这些预言。若获证实，我们的框架将提供基于量子引力与量子信息原理的引人注目的替代方案。

6. 结论

我们构建了一个综合宇宙学模型，其中宇宙永恒、循环，由因果集合时空涌现的非局域纠缠项支配。模型自然解决奇点问题，产生带量子记忆的反弹，并扩展至相互作用单元网络时解释观测均匀性及 H_0、S_8 张力。数值模拟支持机制可行性并预言可测非高斯性。此工作为可被下一代观测检验的量子信息宇宙学开辟路径。

参考文献

[1] R. C. Tolman, *Relativity, Thermodynamics, and Cosmology* (Oxford University Press, 1934).
[2] P. J. Steinhardt and N. Turok, Science **296**, 1436 (2002).
[3] L. Bombelli, J. Lee, D. Meyer, and R. D. Sorkin, Phys. Rev. Lett. **59**, 521 (1987).
[4] S. M. Carroll and J. Chen, Phys. Rev. D **70**, 043501 (2004).
[5] B. Bento, C. J. Fewster, and R. D. Sorkin, Class. Quantum Grav. **38**, 125004 (2021).
[6] ATLAS Collaboration, Observation of quantum entanglement in top-quark pairs, CERN-EP-2024-123 (2024).
[7] Planck Collaboration, Astron. Astrophys. **641**, A6 (2020).
[8] KiDS-1000 Collaboration, Astron. Astrophys. **649**, A141 (2021).